

## LES FORMATIONS SÉDIMENTAIRES DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL ET LE RIO LOA. (« NORTE GRANDE » DU CHILI)\*

Michel RIEU

*Pédologue de l'ORSTOM, BP. 65 Njaména (Tchad)*

### RÉSUMÉ

Située dans le désert du nord du Chili, la Pampa del Tamarugal est une vaste dépression endoréique enserrée entre la Cordillère des Andes et la Cordillère côtière, à 900-1 000 m d'altitude.

Les eaux des Andes, venues s'accumuler dans cette zone au cours du quaternaire, sont à l'origine de vastes dépôts d'évaporites. Le système hydrographique du rio Loa, qui initialement se perdait dans la Pampa, est entré en communication avec l'Océan Pacifique.

L'étude des affleurements d'évaporites et des terrasses du rio Loa dans le bassin de Quillagua, au sud de la Pampa del Tamarugal, permet de définir les étapes du remplissage sédimentaire de cette région et de fixer une chronologie relative de son évolution depuis le Pliocène moyen.

Deux formations sédimentaires et deux formations alluviales se sont succédées depuis lors. Le rio Loa résulte de la jonction de deux réseaux hydrographiques distincts. Incisant profondément la Pampa, il draine vers l'Océan, les eaux de la haute Cordillère. La zone de Quillagua aujourd'hui déconnectée se comporte comme un bassin endoréique suspendu.

### ABSTRACT

Situated in the desert of northern Chile, the Pampa del Tamarugal is a vast endoreic depression enclosed between the Andean Belt and the Coastal Cordillera.

The waters flowing from the Andes which had accumulated in this area during the Quaternary have left broad evaporite-deposits. The Loa river and its tributaries, initially absorbed by the Pampa, flowed into the Pacific Ocean.

The study of the evaporite-outcrops and of the alluvial banks of the Loa river in the basin of Quillagua south of the Pampa del Tamarugal, allows us to define the stages of the sedimentary filling in this area and to fix a relative chronology of its evolution since the mid Pliocene :

Two sedimentary and two alluvial formations have developed since then. The Loa river results from the junction of two distinct hydrographical systems. Actually, deeply embanked in the Pampa, the Loa river drains the waters of the high Cordillera towards the Ocean. The area of Quillagua which is now disconnected, can be considered as an endoreic basin.

### RESUMEN

La Pampa del Tamarugal, situada en el Valle Central de Chile, entre la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa, constituyó durante el Cuaternario una gran depresión endoréica donde se concentraron las aguas superficiales, dejando extensos depósitos de evaporitas. El sistema hidrográfico del río Loa, que al origen se perdía en la Pampa, alcanzó a atravesar la Cordillera de la Costa y desembocar en el Pacífico.

El estudio de los afloramientos de evaporitas y de las terrazas aluviales del río Loa en la cuenca de Quillagua, al sur de la Pampa del Tamarugal, permite definir las etapas del relleno sedimentario y fijar una

\* Cette étude a pu être réalisée lors d'un séjour à l'Ecole de Géologie de l'Université du Nord à Antofagasta (Chili) grâce à l'aimable coopération des responsables de cette Université. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

cronología relativa del desarrollo de esta región a partir del Plioceno medio :

Se depositaron cuatro formaciones.

El rio Loa resulta de la fusion de dos sistemas hidrográficos distintos.

Actualmente, el rio Loa, profundamente encajonado en la Pampa, lleva hacia el Pacífico las aguas de la alta Cordillera, dejando sin drenaje la cuenca de Quillagua.

## ОСАДОЧНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПАМПЫ ДЕЛЬ ТАМАРУГАЛЬ И РИО ЛОА. («НОРТЕ ГРАНДЕ» В ЧИЛИ)

### РЕЗЮМЕ

*Расположенная в пустыне северного Чили, пампа дель Тамаругаль представляет собой обширную бессточную впадину, заключённую между Андийской и береговой Кордильерами, на высоте 900-1000 м.*

*Андийские воды, накопившиеся в этой зоне за четвертичный период, послужили причиной возникновения обширных эвапоритовых отложений. Гидрографическая система рiuо Лоа, которая вначале терялась в пределах пампы, приобрела связь с Тихим Океаном.*

*Изучение выходящих на поверхность эвапоритов и террас рiuо Лоа в бассейне Квиллагва, на юге пампы дель Тамаругаль позволяет определить этапы осадочного заполнения этой области и установить сравнительную хронологию ее развития начиная со среднего плиоцена:*

*Два осадочных и два аллювиальных образования чередовались с этого времени. Рио Лоа возник в результате соединения двух различных гидрографических сетей. Глубоко врезываясь в пампу, он дренирует к океану воды высокой Кордильеры. Зона Квиллагва, ныне отъединённая, имеет характер подвешенного бессточного бассейна.*

### INTRODUCTION

Au nord du 26° parallèle sud, les provinces d'Antofagasta et de Tarapaca constituent le « Norte Grande » du Chili. Ce n'est qu'au 19° siècle que les mineurs poursuivant le mirage de l'or blanc, le salitre, sont venus s'installer dans cette terre inhospitalière. La « Pampa salitrera » a ainsi connu durant quelques

décades la fièvre des pionniers du nitrate et même la guerre pour retomber aujourd'hui dans l'oubli.

Région désertique d'une aridité exceptionnelle, elle n'est traversée entre le 26° et le 19° parallèle que par une seule rivière : le rio Loa. Ce dernier, maigre filet d'eau né dans les Andes, parvient à atteindre l'Océan après s'être faulilé au fond de « quebradas » d'origine tectonique et avoir traversé la « Pampa del Tamarugal » dans sa partie méridionale. Cette pampa est un graben endoréique enserré à 900-1 000 m d'altitude entre la Cordillère des Andes et la Cordillère de la Côte. Elle est constituée d'un ensemble de chotts (Tricart, 1966). Le plus méridional d'entre eux, situé dans le bassin de Quillagua, petite oasis à 785 m d'altitude, est traversé par le rio Loa qui draine vers l'Océan le bassin de Calama situé sur son cours supérieur.

Le fait, apparemment paradoxal, que le rio Loa traverse un bassin endoréique apparaît lié à l'histoire récente de la Pampa del Tamarugal.

Il n'existe que peu d'études sur les formations du plio-pleistocène dans la zone désertique du Chili. R.A. Philippi, (1860), en 1853, a observé des bancs de calcaire dans la région du rio Loa. Ces formations sont aussi signalées par G. Courty en 1903, (1907). Vers 1925, J. Brüggén (1950) et W. Wetzel (1927) consacrent quelques pages aux calcaires du rio Loa, qu'ils associent à l'existence, au quaternaire ancien, d'un immense lac qui aurait rempli la dépression de la Pampa del Tamarugal. Plus récemment, M. Preuilh a étudié en détail les différentes phases de l'évolution du bassin de Calama, sur le cours supérieur du rio Loa, au pliocène et au pléistocène.

Notre étude s'est limitée à la Pampa del Tamarugal de Oficina Maria Elena au sud à Iquique au nord. Les observations que nous avons effectuées ont permis d'une part de préciser en détail les analyses du début du siècle et d'autre part de confirmer les conclusions de Preuilh en mettant en évidence dans la Pampa les séquences identifiées à Calama.

Après avoir brièvement retracé le cadre climatique et structural du bassin de Quillagua, nous analyserons les étapes de son remplissage sédimentaire afin de reconstituer l'histoire récente de la Pampa del Tamarugal.

### LE CADRE CLIMATIQUE

Les conditions de climat sont celles d'une région à l'abri des influences océaniques : la puissante barrière des Andes constitue un rempart de 6 000 m

d'altitude infranchissable aux perturbations venues de l'est. Les influences du désert brumeux côtier sont arrêtées par la Cordillère de la Côte à l'ouest. Une forte inversion thermique située vers 600-800 m empêche les brouillards de s'élever aux 1 000-1 200 m nécessaires pour en utiliser les cols. Seules les fluctuations du niveau d'inversion permettent à des lambeaux de brouillard, la « Camanchaca », de se faufiler par l'étroite et profonde vallée du rio Loa et atteindre la Pampa. Mais cette « camanchaca » est vite dissipée dans la matinée. En effet, les amplitudes thermiques sont importantes et brutales, les températures souvent négatives du petit matin atteignant 35 °C au début de l'après-midi. Les précipitations sous forme de pluie sont nulles depuis des années les pluviomètres n'enregistrant que des traces d'humidité. L'évaporation est très forte en raison d'une humidité relative basse, voisine de 50 %, mais qui peut exceptionnellement descendre au-dessous de 10 %.

La bordure andine connaît un régime plus humide à deux saisons des pluies à la limite sud de la Bolivie. Les précipitations surtout sous forme de neige alimentent le rio Loa, mais gagnent aussi directement la Pampa par circulation de nappes.

La couverture végétale est pratiquement inexistante limitée à quelques épineux sur les berges du rio Loa et à de maigres bouquets clairsemés de Tamarugos, phréatophyte se développant dans les zones basses de la Pampa où la nappe remonte à moins de 10 m de la surface.

#### LE CADRE STRUCTURAL

Au sud de la Pampa del Tamarugal, le bassin de Quillagua occupe une dépression d'origine tectonique. Il est délimité par un ensemble de failles : un premier système de grande ampleur (1), d'orientation nord-sud, le sépare de la Cordillère des Andes à l'est et de la Cordillère de la Côte à l'ouest. Deux systèmes de failles secondaires d'orientation est-ouest et nord-nord-ouest - sud-sud-est marquent les limites nord et sud respectivement.

La Cordillère des Andes est constituée d'un socle rhyolithique, la « puna », soulevé à 4 000 m d'altitude et plongeant sous le remblaiement moderne de la Pampa par une flexure monoclinale. Sur ce socle s'élève jusqu'à 6 000 m l'appareil volcanique néogène,

(1) La faille de la bordure ouest de la Pampa ou faille « La Negra » est caractéristique de l'ampleur des mouvements tectoniques qui ont affecté et affectent encore le nord du Chili. Rajeunie par un rejeu récent, elle peut être suivie sur près de 800 km, de Copiapo au sud jusqu'à Iquique au nord.

andésitique et basaltique. A la hauteur de Quillagua, vient se souder au versant occidental des Andes une cordillère secondaire, la Sierra de Moreno, d'une altitude moyenne de 4 000 m, formée de roches diverses : granites paléozoïques, granodiorites crétacées et formations sédimentaires du Jurassique supérieur. Le pied de la Cordillère des Andes est remblayé par de grands glacis d'âge Tertiaire. Sur ces derniers s'étalent les immenses cônes de déjection nés dans les « quebradas » qui descendent des Andes et de la Sierra de Moreno. De petits ravins aux cours sinueux parcourent les cônes et se perdent sur le glacis en une multitude de chenaux anastomosés.

La Cordillère de la Côte, étroite et moins élevée, est fortement affectée par les systèmes de failles transversaux (E-W et NNW-SSE) qui mettent en contact des massifs de roches différentes. Du sud au nord ce sont :

- le Cordon de la Encanada, constitué de granites crétacés et d'andésites jurassiques, qui s'élève à 1 300 m,

- les Cerros de la Angostura, où alternent des roches sédimentaires paléozoïques (schistes et grauwaques) avec des granites du même âge et des andésites jurassiques. Ils sont limités au nord par le canon du rio Loa qui traverse la Cordillère de la Côte le long d'une faille est-ouest,

- au-delà, la succession des blocs de roches paléozoïques et jurassiques se prolonge, organisé en un système symétrique de paliers successifs présentant un effondrement en son centre. Cet ensemble, d'altitude moyenne 1 200 m s'amenuise vers le nord pour ménager les bassins des « salares » de Soronal et Bellavista.

Au nord, le verrouillage du bassin est assuré par le Cordon de la Sal et le Cerro Termino (1 045 m), horsts délimités par les failles est-ouest. Ils se raccordent à la Cordillère de la Côte.

Au sud, les inselbergs des Cerros de la Joya (1 300 m) constitués de granites paléozoïques et crétacés forment un seuil que le rio Loa ne franchit que par une gorge abrupte. Ils se trouvent en bordure d'une faille d'orientation NNW-SSE qui, de la Sierra de Moreno, traverse la Pampa pour venir longer le Cordon de la Encanada.

Enfin quelques inselbergs émergent au centre du bassin de Quillagua :

- Les Cerros de Soledad (900-1 000 m) constitués de roches jurassiques.

- Le Cono de Hilaricos (1 060 m).

- La Loma de Sal (961 m).

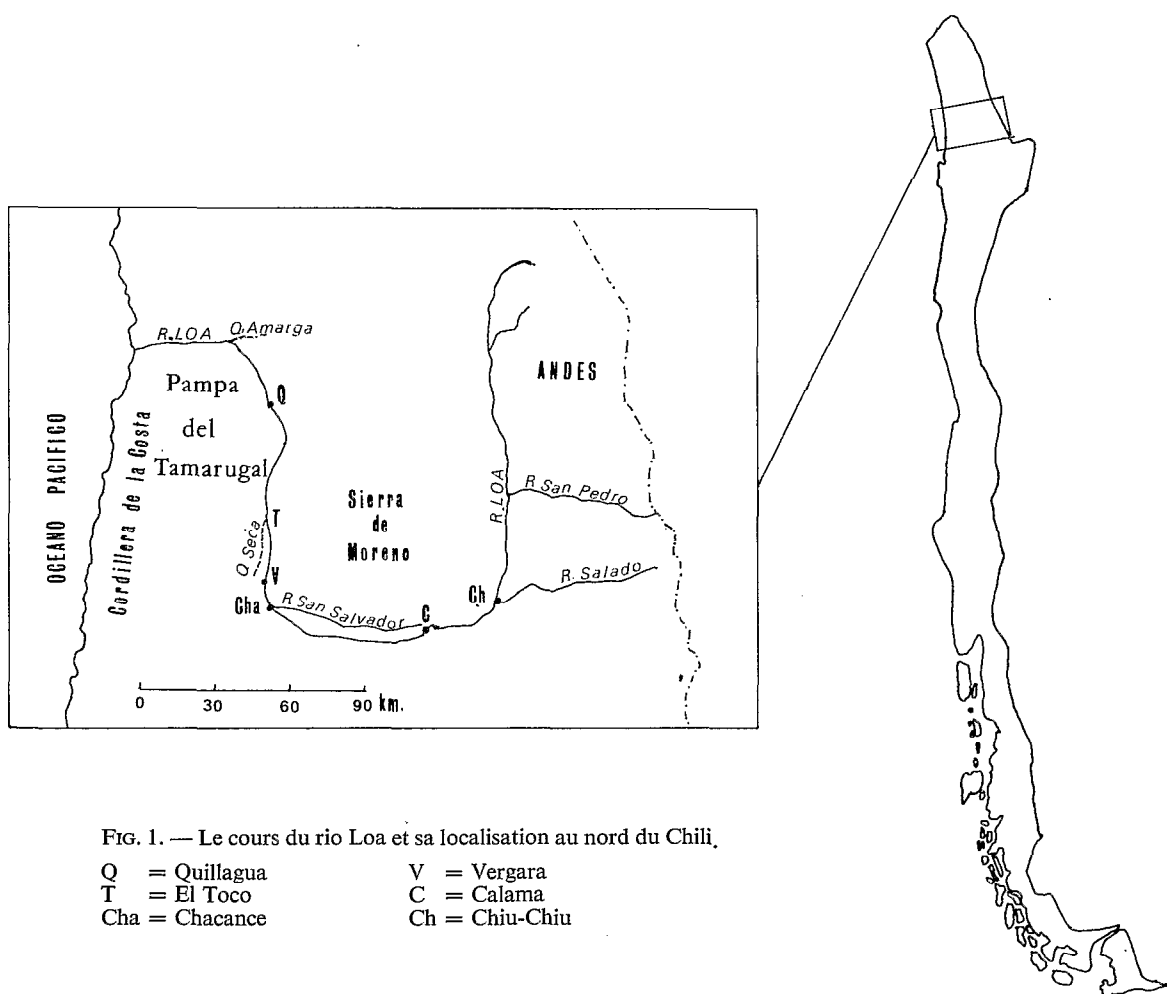


FIG. 1. — Le cours du rio Loa et sa localisation au nord du Chili.

Q = Quillagua	V = Vergara
T = El Toco	C = Calama
Cha = Chacance	Ch = Chiu-Chiu

### 3. LE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE

Le graben de la Pampa del Tamarugal a été remblayé par diverses formations sédimentaires et alluviales, détritiques et chimiques. Ce remblaiement est lié à deux types de phénomènes :

- Des mouvements tectoniques.
- Des pulsations climatiques.

La succession de ces formations, de la plus ancienne à la plus récente peut se résumer ainsi :

- Sur le conglomérat de base, une première formation sédimentaire lacustre, la formation Loa (calcaire, gypse, anhydrite).
- Une formation intermédiaire détritique.

— Une deuxième formation sédimentaire, probablement lagunaire, la formation Quillagua, (diatomites, tuffs).

— Plusieurs terrasses dans la vallée du rio Loa : la formation San Salvador et, dernière en date, la formation des Argiles de la Vega.

Ce mode de succession a pu être établi par des examens effectués dans la partie amont du rio, dans la partie médiane de son cours et enfin, de façon privilégiée, dans le bassin de Quillagua.

*La partie amont du rio Loa (Chiu-Chiu, Calama). Echelle stratigraphique*

Dès Conchi Viejo, non loin de Chiu-Chiu dans la haute Cordillère, à 3 000 m d'altitude, Wetzel (1927)

et Bruggen (1950) signalent une formation de calcaires d'eau douce reposant sur des rhyolites. Vers 2 500 m dans la « Vega » de Calama, les bancs de calcaire peuvent atteindre 10 m de puissance. Il s'agit d'un calcaire siliceux, grisâtre, massif, riche en mollusques d'eau douce (*Pisidium chilense* d'Orb. ; *Helisoma Taphius andecolatus montanus* d'Orb.) (Wetzel, 1927). Le dépôt repose sur des conglomérats ou grès peu consolidés qui font place vers l'aval à « une argile rouge, quelque peu arénacée et riche en éléments détritiques rhyolitiques, à stratification peu prononcée » Bruggen (1950). Dans la Vega de Calama, les dépôts disparaissent sous une épaisse couverture de bancs de diatomine blanche alternant avec des lits de sables fins grisâtres et des lentilles de graviers. Des tufs calcaires fossilisant des plantes de marais apparaissent parfois à proximité de la surface. Les diatomites, selon Husdett (s.d.) contiennent approximativement 30 % de formes d'eau salée et 70 % de formes d'eau douce, dont au moins 20 % sont de type halophile.

Nous trouvons donc deux formations superposées : la première, constituée de calcaires lacustres correspond à une sédimentation chimique ; la deuxième, constituée de matériaux fluviaux et biochimiques correspond à une sédimentation de type déritique, dans une ambiance lagunaire.

Dans la région de Calama, Preuilh (s.d.) signale en outre la présence de deux terrasses emboîtées. Il dénomme la terrasse supérieure formation San Salvador et la terrasse inférieure formation des Argiles de la Vega. Cette dernière est constituée essentiellement d'argiles grises et de cendres volcaniques ; la première consiste en un dépôt plus grossier de sables et graviers alternant avec des bancs de diatomite.

Ces quatre formations constituent le remplissage sédimentaire de la Pampa del Tamarugal. L'échelle stratigraphique de ce remplissage peut être représentée sous la forme du tableau ci-après.

*Les dépôts de la vallée du rio Loa. (Le « U » autour de la Sierra de Moreno).*

Quelques coupes observées dans le canon du rio Loa, tout au long du « U » qu'il décrit de la Sierra de Moreno permettent d'étudier les variations dans le faciès et la disposition de ces formations. De Calama jusqu'à l'extrémité sud-ouest de la Sierra de Moreno, l'altitude décroît rapidement de 2 500 à 1 400 m,

au long des 50 km de ce tronçon. Les bancs de calcaire de la première formation sédimentaire marquent un pendage parfois fortement prononcé.

Le rio Loa après un coude de 90° prend alors la direction sud-nord. En ce point, il reçoit les eaux du rio San Salvador qui depuis la Vega de Calama suit un cours parallèle à 5 km plus au nord. A la confluence (Chacance) nous observons la coupe représentée sur la figure 2, (photo 1, pl. I).

Les matériaux de la deuxième formation sédimentaire sont épandus sur les argiles rouges sableuses qui reposent sur le conglomérat de base. La vallée du Loa ne comporte plus qu'une seule terrasse, celle des argiles de la Vega ; la terrasse San Salvador n'apparaît pas. La première formation sédimentaire n'affleure pas ; par contre des buttes tabulaires de sulfate de calcium dominent le paysage à peu de distance de la quebrada. Il s'agit essentiellement d'une anhydrite massive, saccharoïde, blanche, riche en globules de silice, dont la partie superficielle est altérée en une croûte blanche très dure, craquelée en petits polygones de quelques centimètres de côté, soudés entre eux par un ciment grisâtre, riche en sulfate de calcium. Les polygones sont finement sculptés en micro-lapiez, (photo 3, pl. II) (1).

Nous retrouvons à Vergara, à 40 km plus au nord, une coupe semblable : une seule terrasse est représentée, celle des Argiles de la Vega. La quebrada du Loa recoupe les calcaires de la première formation sédimentaire avec leur faciès caractéristique. Les buttes d'anhydrite apparaissent légèrement en retrait de la vallée, à la base de la Sierra de Moreno (fig. 3).

Quelques 30 km en aval, à El Toco, le rio Loa reçoit un affluent sur sa rive gauche. Le seul depuis Calama jusqu'à l'embouchure : la Quebrada Seca. Taillée dans la deuxième formation sédimentaire, elle possède une terrasse d'argiles limoneuses rougeâtres et salées alternant avec des bancs de diatomites. A la confluence cette terrasse est recoupée par la vallée du Loa qui comporte toujours la terrasse inférieure des argiles de la Vega. Enfin, immédiatement à l'aval de la confluence, apparaît la terrasse supérieure San Salvador. La rive gauche du rio Loa montre le raccord entre cette terrasse supérieure et celle de la Quebrada Seca. *Ainsi, la terrasse supérieure qui avait disparu de la Quebrada du Loa depuis Chacance*

(1) Il ne semble pas qu'il s'agisse ici du faciès « chicken-wire » mais plutôt d'une forme d'érosion due à l'action combinée de l'humidité atmosphérique nocturne (aérosols = Camanchaca), des amplitudes thermiques quotidiennes et de la corrosion éolienne.

« Vega » : petit bassin alluvial sur le cours d'une vallée.

Formation	Type localisation	Lithologie et faciès	Variations
Formation Argiles de la Vega	Terrasse continue dans la vallée du Rio Loa encastée dans la F. San Salvador	Argiles grises à gris bleuté. Limons gris à rougeâtre. Sables fins grisâtres. Cendres volcaniques gris clair.  Dépôt fin et alterné souvent finement stratifié en bancs parallèles et réguliers.	Faciès peu variable.  A l'amont, dans le secteur de Chiu-chiu, apparaissent à la base de la série des sables bruns non consolidés.  Puissance : 2 m environ en amont de Calama. Plus de 5 m à Quillagua.
Formation San Salvador	Terrasse discontinue dans la vallée du Rio Loa	Diatomites, sables et graviers, argiles rougeâtres plus rares. Parfois, bancs de tufs calcaires.  Stratification croisée, grossière.	Grande variabilité de Faciès. Nombreuses lentilles de graviers et galets emballés dans un matériau plus fin.  A l'amont, sables bruns non consolidés à la base.  Bouchons de tuf calcaire ayant vraisemblablement obstrué la vallée du Rio Loa à l'amont de Chiu-Chiu, à l'aval de Calama et à El Toco.  Puissance : 5 à 15 m.
Deuxième Formation sédimentaire (Formation QUILLAGUA)	Formation lagunaire discontinue, d'extension variable localisée dans le U du tracé du Rio Loa	Diatomites, limons gris clair, sables fins et cendres volcaniques, tufs et croûtes calcaires et sulfatés, en lits alternés d'épaisseur variable. La régularité de la stratification est souvent perturbée par des phénomènes postérieurs de dissolution et cristallisation des sels solubles (gypse, halite).	Puissance variable : quelques mètres à l'amont (Calama), plusieurs dizaines de mètres dans la Pampa del Tamarugal. Alternant avec les zones de grande extension du dépôt, présence de goullets étroits présentant des matériaux plus grossiers et à stratification croisée et tourmentée. Pas de sulfates en amont de Chacance. Déformations importantes (ondulations et cassures) d'origine tectonique.
Formation intermédiaire	Formation détritique	Limons et argiles rouges salés ou éléments clastiques de roches volcaniques.	Discontinue. Pas de matériaux grossiers dans la Pampa del Tamarugal. Puissance : 8 à 10 m en amont ; 50 m à Quillagua.
Première Formation sédimentaire (Formation LOA)	Formation lacustre continue, en forme de U correspondant au tracé du Rio Loa	Calcaire lacustre siliceux de couleur grise assez riche en coquilles de mollusques. Massif. Gypse cristallisé et anhydrite saccharoïde, massive.	Grès calcaire à l'amont de Chiu-Chiu. Calcaire siliceux de Chiu-Chiu à Chacance. Calcaire siliceux et anhydrite en l'aval de Chacance. Gypse à Quillagua. Puissance : Calcaires de 0,5 à 10 m. Anhydrite de 5 à 15 m. Gypse de 10 à 15 m. Très érodé et tectonisé.
Conglomérat de base	Formation détritique	Galets hétérogènes peu émoussés de roche volcanique, emballés dans des sables gris. Cendres volcaniques, bancs argileux gris ou roses. Argiles rouges (Coba) avec intercalation de lit de sable.	Puissance beaucoup plus grande à l'amont de Calama que vers l'aval. Des argiles rouges (Coba) apparaissent à l'amont de Calama et prennent une grande extension vers l'aval. Puissance : non estimée.

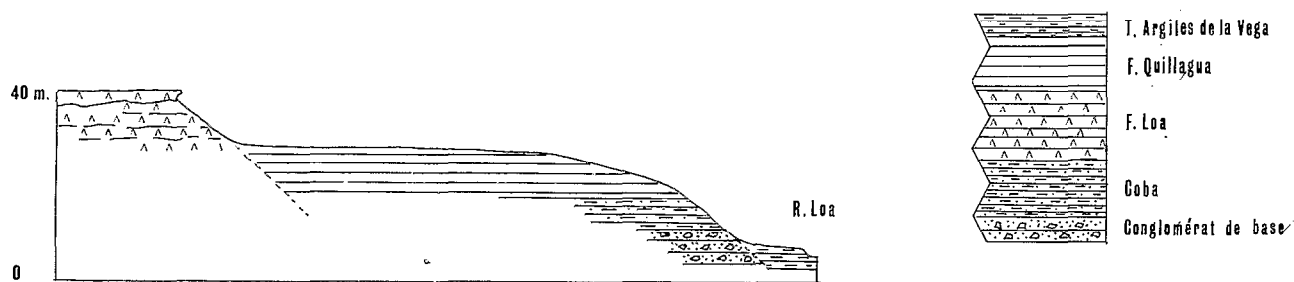


FIG. 2. — Coupe de la rive gauche du rio Loa à Chacance. La formation Quillagua repose directement sur les argiles rouges de la «Coba», la formation Loa ayant été érodée en ce point. Elle apparaît à une centaine de mètres, en retrait de la rivière sous la forme de buttes d'anhydrite.

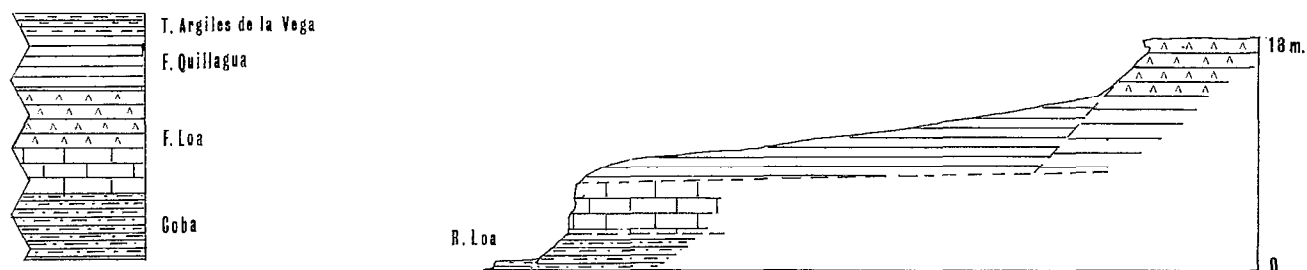


FIG. 3. — Coupe de la rive gauche du rio Loa à Vergara. La formation Quillagua est encastrée dans la formation Loa partiellement érodée. Cette dernière présente les deux faciès carbonaté et sulfaté. Seule la terrasse des Argiles de la Vega apparaît dans la vallée.

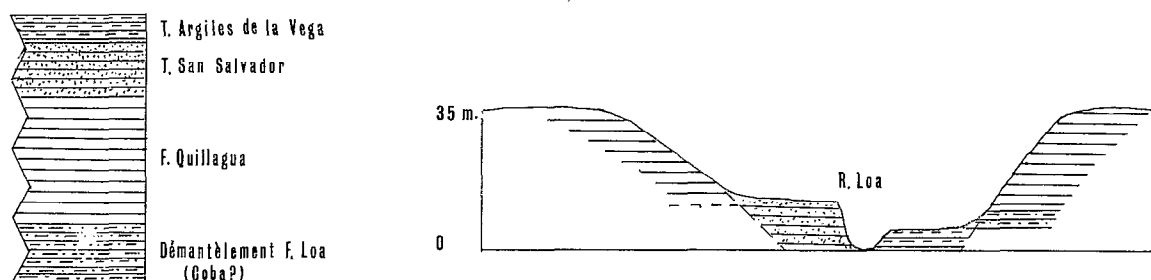


FIG. 4. — Coupe de la vallée du rio Loa à El Toco. La formation Loa semble complètement érodée ; la formation Quillagua repose sur un matériau argileux rouge très semblable à la «Coba». La terrasse San Salvador réapparaît sur la rive orientale. (La confluence avec la Quebrada Amarga est à 50 m : en amont). (Cf. photo n° 3).

réapparaît dans un affluent de la rivière. La première formation sédimentaire n'est pas représentée en ce point (fig. 4).

Quelques kilomètres plus au nord, la vallée du Loa se resserre en une gorge étroite et rocheuse pour franchir le verrou sud du bassin de Quillagua à travers l'ensemble des Cerros de la Joya et du Cordon de la Encanada. Seule la terrasse inférieure très étroite apparaît dans la gorge. L'on discerne cependant un fin liseré discontinu suspendu au-dessus de la terrasse inférieure. *Il s'agit d'un reste, situé à un niveau anormalement élevé, de la terrasse supérieure.* Les sommets des parois présentent un dépôt de faible épaisseur de matériaux analogues à ceux de la deuxième formation sédimentaire (photo 3, pl. I).

#### *Les dépôts du bassin de Quillagua*

A la sortie du bourg de Quillagua, face au poste douanier de la route Panaméricaine le versant de la vallée du Loa offre une coupe de 70 m (fig. 5 ; photo 4, pl. I).

De 0 à 20 m un ensemble de bancs de diatomite blanche très pure en bancs épais alternant avec des limons gris clair, riches en débris organiques de plantes aquatiques et des lits peu épais, plus compacts, de couleur claire, riches en sulfates et chlorures (photo 1, pl. II).

De 20 à 60 m un niveau finement stratifié de limons et argiles rougeâtres, salés.

De 60 à 70 m un banc de gypse cristallisé en éléments de grande taille maclés en fer de lance (60 à 80 cm). Le sommet de ce banc est constitué d'une pellicule d'anhydrite très compacte corrodée, caverneuse, présentant le réseau polygonal observé sur les buttes tabulaires de l'amont. La formation de gypse est ennoyée par une terrasse argileuse rouge et rose,

finement stratifiée de lits blancs de diatomite et gris de cendres.

Imbriquée dans cette terrasse, une deuxième terrasse plus réduite, d'argiles plus grises et de limons brunâtres alternant avec des lits de diatomite et de sables et cendres blancs à gris. Elle est entaillée par le cours actuel du Loa.

Les quatre formations apparaissent donc sur cette coupe : la terrasse des Argiles de la Vega est emboîtée dans la terrasse supérieure San Salvador, la formation sédimentaire de la base semble avoir été érodée partiellement. Sur cette dernière apparaît la deuxième formation, très puissante en ce point, dont le soubassement est constitué d'une argile rouge semblable à la « coba » observée sous la première formation dans la Vega de Calama.

Du point de vue spatial, les différentes formations affleurent dans le bassin de Quillagua de manière grossièrement concentriques : le centre est occupé par des colluvions récentes, elles-mêmes entourées de la deuxième formation sédimentaire. Sur la périphérie affleurent les sulfates (voir carte du Bassin de Quillagua).

— Au S-W, au pied du Cordon de la Encanada et des Cerros de la Angostura, apparaissent des bancs disloqués d'anhydrite et de gypse. Ils se présentent comme des lambeaux d'une ancienne surface structurale, accrochés au flanc de la montagne, émergeant des diatomites et limons de la deuxième formation.

— Au S-E, un ensemble de plateaux présente le même faciès, mais moins détruit. Ce sont des tables d'anhydrite grevées de dolines qui dominent de quelques dizaines de mètres les dépôts modernes des

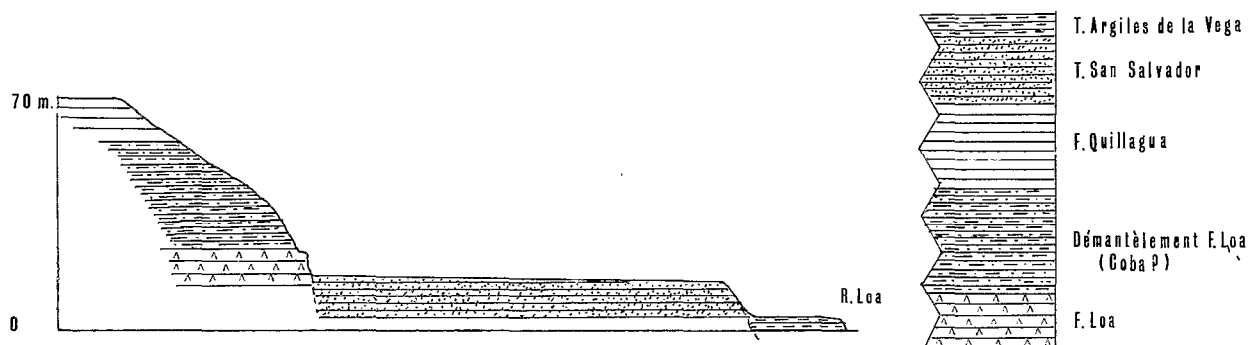


FIG. 5. — Versant oriental de la vallée du rio Loa à la douane de Quillagua. Les quatre formations sont représentées. Les argiles rouges semblables à la « Coba » apparaissent intercalées entre les deux formations sédimentaires. (Cf. photo n° 4, pl. I).



cônes de déjection descendant de la Cordillère des Andes. Quelques Quebradas sèches les découpent en unités plus petites.

— Enfin la bordure N-W du bassin est formée par une puissante ceinture d'anhydrite de 2 à 10 km de large, adossée aux flancs de la Cordillère de la Côte et du Cordon de la Sal. De maigres cônes de déjection viennent localement ennoyer le contact. Profondément affectée par le jeu des failles de la Cordillère de la Côte, cette ceinture descend par paliers vers le centre du bassin. La surface en est chaotique, percée d'innombrables dolines de petite taille, parfois coalescentes en ouvalas dont le fond est occupé par des efflorescences salines de grande taille (10-30 cm) sous la forme de champignons botryodaux. D'autres secteurs, en particulier, la partie nord, se présentent comme un amoncellement de blocs bouleversés : c'est un karst. Le matériau est essentiellement de l'anhydrite, massive et blanche, en bancs épais de plusieurs mètres à moins d'un mètre, friables en profondeur, durs et cassants en surface. Cette anhydrite est en général couverte d'une couche peu épaisse (20 à 80 cm) d'une argile brune limoneuse, parfois sableuse, salée, à structure soufflée, localement remaniée par des actions éoliennes. Lorsque l'anhydrite affleure, elle présente le faciès polygonal craquelé, finement ciselé en micro-lapiez (photo 3, pl. II).

La moyenne de 36 échantillons prélevés dans la partie nord de la ceinture d'anhydrite correspond à la composition chimique suivante :

insoluble aux acides (silicates)	16,14 %
H <sub>2</sub> O	0,83 %
CaSO <sub>4</sub>	74,32 %
SO <sub>3</sub> non combiné avec CaO	1,43 %
NaCl	8,92 %

Dans la partie sud du bassin, la formation de sulfates disparaît sous les dépôts de la deuxième formation sédimentaire. Celle-ci s'étend largement vers le nord et l'est. Les quelques coupes observées montrent un faciès identique à celui de la douane de Quillagua. Quelques ondulations très douces affectent l'horizontalité des bancs. Vers le centre-est du bassin, les colluvions provenant des cônes de déjection de l'Arca à l'est et de Guatacondes au nord recouvrent cette formation. Elles sont finement stratifiées en lits d'argile brun rougeâtre, de sables gypseux plus gris et plus rarement de graviers. L'érosion hydro-éolienne les a fortement affecté : des lits d'anciens chenaux tapissés de galets de rhyolites corrodés par les vents de sable apparaissent en relief sur un modelé de nebkhas et de yardangs de petite taille.

C'est la zone du Salar de Llamara. Le point le plus bas ne dépasse pas 720 m d'altitude, c'est-à-dire légèrement au-dessous du niveau actuel du rio Loa à son entrée dans la Cordillère de la Côte. Des croûtes salines, épaisses, généralement surmontées d'excroissances de sel cristallisé, de forme botryodale, identiques à celles des dolines de la ceinture occupent la plus grande partie de ce secteur. Une série de « cenotes », certains en partie obstrués par les cristallisations, est alignée suivant un axe N-S au cœur du Salar.

Quelques inselbergs ont été signalés au centre du bassin :

— Les Cerros de Soledad, portent étagés sur leurs flancs jusqu'à quatre niveaux parallèles et horizontaux de croûtes sulfatées, dures et compactes. Débris de surface structurale restés accrochés à la montagne, elles sont identiques à celles observées au pied du Cordon de la Encanada. Parfois même, la croûte épouse la forme du sommet de l'inselberg, est brisée à sa bordure et se retrouve à la base, collée au versant, avec un fort pendage, plongeant dans les colluvions. A peu de distance des Cerros de Soledad, de petits dômes crèvent la surface des colluvions. Leur structure est mise à nu par l'érosion : ce sont des auréoles concentriques d'anhydrite alternant avec des argiles sableuses, rougeâtres. Nous ne pensons pas qu'il s'agisse de dômes de sel, mais plus vraisemblablement de boursouffures de la formation de sulfates dues à la pression d'apophyses des Cerros de Soledad, moins soulevées que ces derniers (fig. 7). Des croûtes d'anhydrite identiques aux précédentes se retrouvent sur les hauteurs du Cerro Termino au N-E.

— Le Cono de Hilaricos et la Loma de Sal au sud ont un aspect semblable aux dômes : leur sommet est couvert de bancs d'anhydrite fortement déformés, localement brisés, qui plongent en discordance angulaire sous la deuxième formation sédimentaire, elle-même relevée au contact.

### *Les dépôts de la vallée du rio Loa en aval de Quillagua*

Le rio Loa traverse le S-E du bassin de Quillagua en recoupant la deuxième formation sédimentaire et les dépôts de gypse. A 15 km en aval de Quillagua, nous observons la coupe de la figure 8 : la deuxième formation sédimentaire repose en discordance angulaire sur le banc de gypse relevé de 10° vers l'ouest. Un épais conglomérat peu consolidé sépare ce dernier des schistes paléozoïques sub-verticaux.

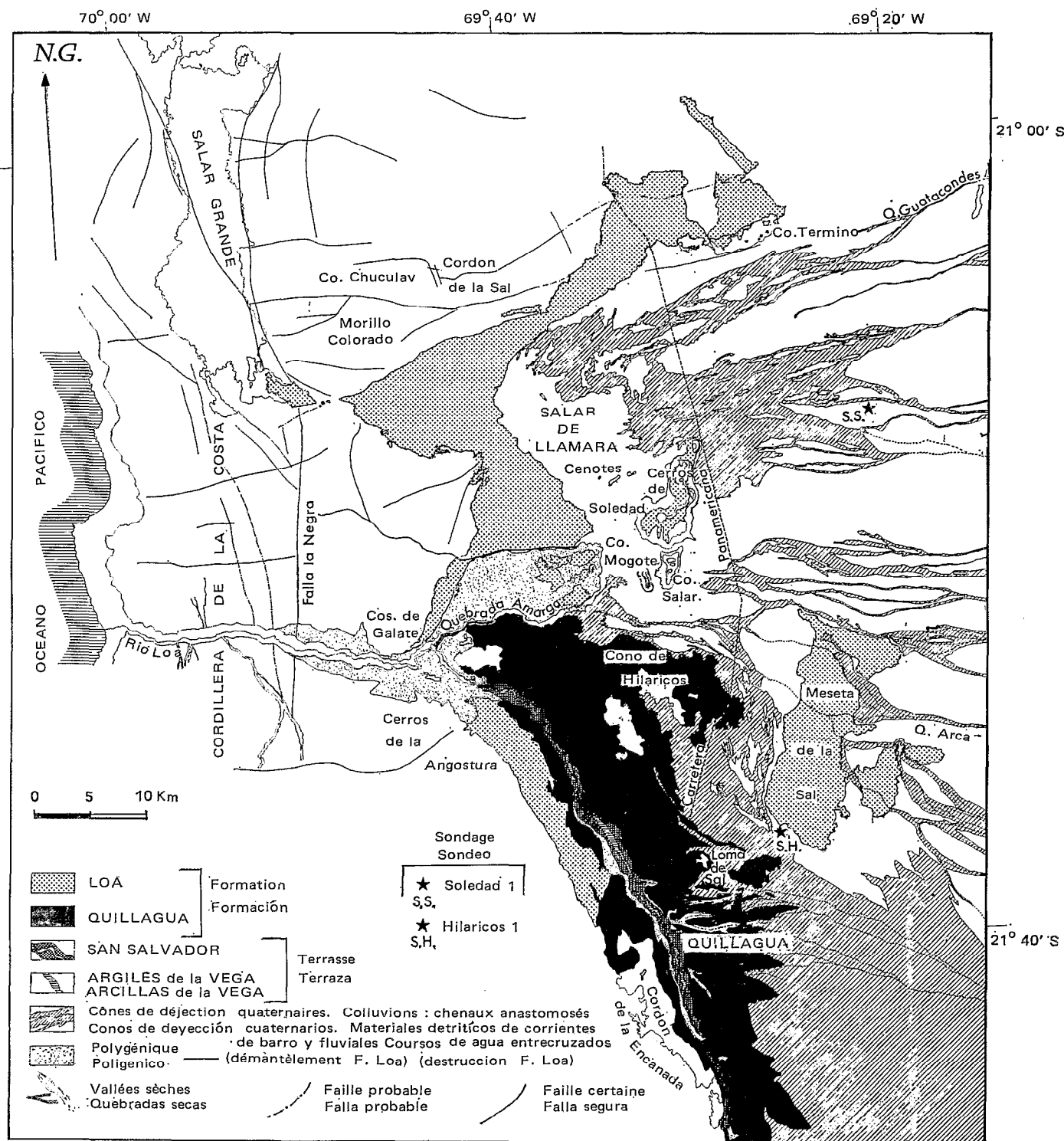


FIG. 6. — Carte du bassin de Quillagua.

Les deux formations alluviales occupent le fond de la vallée, large de près d'un kilomètre. Vers l'aval elle se resserre brusquement en un étroit canon encaissé dans les schistes des Cerros de la Angostura. La formation San Salvador est absente. Par contre la terrasse inférieure est observable. Quelques kilomètres plus au nord, le rio Loa reçoit un affluent sur sa rive droite : la Quebrada Amarga, vallée sèche suspendue de quelques mètres au-dessus du lit du

Loa. A la confluence, le rio Loa marque un coude accentué de 90° pour prendre la direction E-W, dans l'axe de la Quebrada Amarga, qu'il conserve jusqu'à son embouchure dans le Pacifique 15 km plus à l'ouest. Il coule au fond du canon profond de 600 m dont les parois abruptes ne montrent aucune entaille d'un affluent descendant des hauteurs de la Cordillère de la Côte. Par contre le canon recoupe des vallées sèches suspendues à 550 m au-dessus du niveau actuel

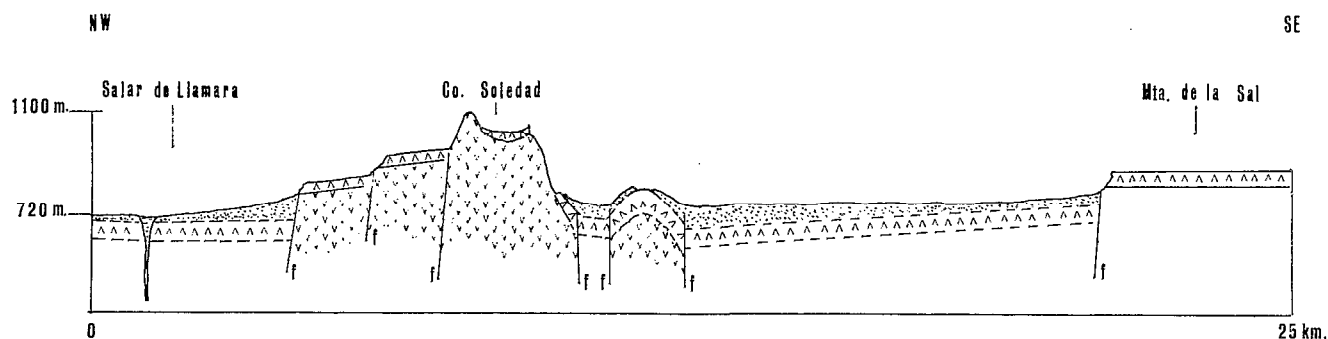


FIG. 7. — Coupe schématique du bassin de Quillagua selon un axe NW-SE entre la Meseta de la Sal et le Salar de Llamara. La surrection des horsts déforme et brise les bancs de gypse de la formation Loa, donnant naissance à des dômes et des surfaces résiduelles.

de la rivière, sans raccord de pente.

#### *Conclusions sur le remplissage sédimentaire de la Pampa del Tamarugal*

En résumé, dans le bassin de Quillagua, nous rencontrons :

- une formation de sulfates, gypse à Quillagua et anhydrite à Llamara, fortement déformée par la tectonique et le karst.

- emboîtés dans cette dernière, le plus souvent en discordance angulaire, se trouvent les bancs de diatomite, d'argiles et de limons de la deuxième formation sédimentaire.

- cette dernière disparaît à son tour sous les colluvions argileuses descendues directement de la Cordillère des Andes.

Dans le lit du rio Loa, deux terrasses sont emboîtées, l'une d'argiles rougeâtres, alternant avec des cendres et des diatomites, semblable à la formation San Salvador, qui est discontinue ; l'autre de matériaux

limono-argileux bruns, identique à la formation des Argiles de la Vega, qui est toujours présente.

A en juger par le faciès, la disposition par rapport aux autres niveaux sédimentaires et l'état actuel de conservation, il est vraisemblable que les gypses de Quillagua et les anhydrites de Llamara sont l'équivalent des tables d'anhydrite rencontrées à Chacance et Vergara. Seule une analyse minéralogique détaillée et la recherche des éléments-trace contenus dans le sédiment pourront confirmer cette hypothèse de terrain.

En amont de Quillagua, les tables d'anhydrite se rencontrent à un niveau plus élevé que les calcaires recoupés par la Quebrada du Loa. A Quillagua le faciès carbonaté n'affleure pas. Cependant nous avons trouvé à la surface du sol dans la zone bouleversée comprise entre les Cerros de la Angostura et le rio Loa, des blocs de calcaire avec le faciès et les fossiles caractéristiques de la première formation sédimentaire du bassin de Calama. Il est probable que, localement, des lentilles de calcaires soient sous-jacentes à la formation de gypse et anhydrite qui correspondrait dans ce cas à une variation latérale de faciès de la

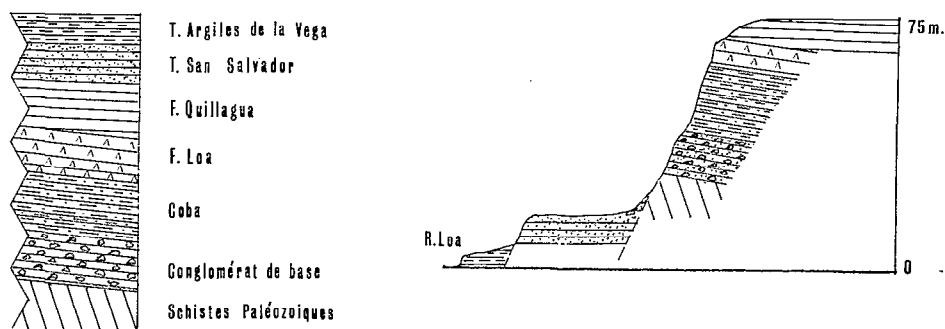


FIG. 8. — Versant de la rive droite de la quebrada du rio Loa, 15 km, en aval de Quillagua.

première formation sédimentaire. C'est ce que semble confirmer le sondage de « Soledad 1 » (1) :

- 0-113 m dépôts détritiques de piedmont : sables, colluvions et conglomérats.
- 113-315 m formation sédimentaire détritique d'argiles, limons, diatomite et anhydrite reposant sur un conglomérat de base.
- 315-574 m formation sédimentaire lacustre : alternance de bancs de gypse, d'anhydrite, de calcaire et d'argiles.
- 574-603 m conglomérat de base résultant de l'érosion de formations mésozoïques.

Cet ensemble repose sur la formation Empexa, d'âge crétacé.

Par contre le sondage de « Hilaricos 1 » ne fait pas apparaître le faciès carbonaté :

- 0- 29 m colluvions argileuses.
- 29- 44 m formation sédimentaire détritique de limons, sables, argiles peu cimentée alternant avec des niveaux détritiques siliceux, gypseux ou clastiques.
- 44-482 m formation sédimentaire lacustre : alternance de bancs de gypse, anhydrite et argiles (gypse prédominant).
- 482-930 m conglomérat de base alternant avec des niveaux plus argileux.

Cet ensemble repose sur des dacites d'âge indéterminé, probablement mésozoïque.

(1) Sondages effectués par l'Empresa Nacional del Petroleo, Chili. Renseignements aimablement communiqués par la Corporacion del Fomento de la Produccion.

Ces sondages sont situés à quelques dizaines de kilomètres l'un de l'autre sur la bordure orientale du bassin de Quillagua. Il n'est pas étonnant de rencontrer une forte épaisseur de colluvions, surtout en « Soledad 1 » qui se trouve sur le cône de déjection de la Quebrada de Guatacondes. Ils font apparaître la variabilité du faciès et de la puissance des deux formations sédimentaires. En particulier, la première formation sédimentaire n'est pas constituée d'un seul dépôt, mais de l'alternance de bancs d'argile, de calcaire, de gypse et d'anhydrite. De dureté inégale, ces bancs ont résisté différemment à l'érosion. Ainsi s'explique l'étagement des croûtes résiduelles sur les flancs des Cerros de Soledad. Elles correspondent à l'ancrage sur le horst de quatre bancs d'anhydrite, les niveaux intermédiaires plus tendres ayant été érodés. Enfin les sondages nous révèlent que les deux formations sédimentaires sont les seules avec les formations alluviales à avoir participé au remplissage du sillon tectonique de la Pampa del Tamarugal, le reste consistant en des conglomérats de base ou intermédiaires.

#### LE MÉCANISME

Les observations qui précèdent permettent d'ébaucher le mécanisme de mise en place et l'évolution du remplissage sédimentaire de la Pampa del Tamarugal.

#### *Le conglomérat de base*

Il est vraisemblable que la mise en place du conglomérat de base et de la « Coba », (argiles rouges riches en éléments rhyolitiques) correspond à la convergence de deux phénomènes géologique et climatique. Un

rajeunissement du relief d'une part, dû au rejeu du système de blocs et failles, un pluvial (1) d'autre part. Les éléments clastiques grossiers arrachés aux secteurs relevés ont été entraînés par des eaux à forte compétence dans les zones basses. Par la suite la compétence des eaux devenant plus faible ce sont des éléments plus fins, sableux et argileux, hérités de l'érosion et altération des rhyolites qui sont déposés dans les cuvettes.

### *La formation Loa*

Enfin s'installe un système lacustre qui préside à la formation des calcaires et des sulfates. La pureté de ce dépôt, le fait qu'ils ne contiennent guère d'éléments détritiques et que l'on ne retrouve pas de cônes de déjection imbriqués dans leur bordure au pied de la Sierra de Moreno et de la Cordillère de la Côte plaident en faveur de l'allochtonie, l'alimentation en eau provenant exclusivement de la Cordillère des Andes. Le pluvial correspondant à la formation Loa aurait donc été très localisé dans la zone des Andes chileno-boliviennes actuelles. Dans la Pampa del Tamarugal, les fluctuations de cette période pluviale ont été fidèlement enregistrées : les sondages révèlent en effet l'existence de plusieurs bancs de calcaire ou de gypse et anhydrite alternant avec des niveaux d'argile lacustre. Cette hétérogénéité de faciès ainsi que la variabilité de la composition chimique permettent de penser que la sédimentation lacustre Loa s'est étalée sur une période de temps assez longue au cours de laquelle les précipitations ont été fluctuantes et l'extension du lac variable. A ce propos il est important de signaler que si bien l'on retrouve des calcaires tout au long du U caractéristique de la formation Loa, les sulfates sont absents en amont de Chacance. Seule la Pampa del Tamarugal semble avoir été le siège de la sédimentation sulfatée normalement postérieure à la précipitation des carbonates.

Il est remarquable de trouver tout au long du U décrit par le rio Loa le passage d'un faciès géochimique à l'autre : ainsi, à l'amont de Calama, la formation Loa est un calcaire grossier, très riche en éléments siliceux. Vers Calama, ce calcaire est déjà plus fin et les fossiles sont abondants. Ce n'est qu'à partir de Chacance que les sulfates font leur apparition alors que les calcaires n'affleurent plus en aval de

Vergara. Sur la périphérie du salar de Llamara, la ceinture d'anhydrite contient environ 10% de NaCl. Ces anhydrites communiquent, par un léger ensellement situé au nord-ouest du bassin de Quillagua, avec le Salar Grande (fig. 6). Ce dernier, d'une superficie de 235 km<sup>2</sup>, est constitué d'un dépôt de halite cristallisée d'une puissance moyenne de 100 m d'une pureté et homogénéité exceptionnelles (la teneur en NaCl est supérieure à 99 % sur l'ensemble du dépôt). Son origine continentale est confirmée par l'absence de toute autre évaporite et une teneur en brome extrêmement faible (3 ppm).

Des carbonates aux chlorures, cette succession latérale suggère l'existence d'une série de lacs plus ou moins communicants où les eaux, de plus en plus minéralisées au fur et à mesure de leur cheminement vers le nord et l'Océan, auraient précipité les sels dans l'ordre des solubilités croissantes, le terme ultime étant le graben du Salar Grande où seraient venues s'évaporer les saumures débarrassées des éléments insolubles et des sels les moins solubles.

### *Destruction de la formation Loa*

Succédant à la période calme de la sédimentation Loa, un rejeu d'origine tectonique des blocs constituant les Cordillères a impliqué une modification considérable du modelé : la nappe rhyolitique qui jusqu'alors était au même niveau que la Pampa del Tamarugal est relevée jusqu'à 4 000 m pour devenir la Puna (Ruiz Fuller, 1965). Les sédiments de la formation Loa enregistrent ces mouvements : nous notons une différence de niveau de 1 000 m entre les calcaires de Calama et ceux de Vergara ; ainsi s'explique la flexure que présente le banc de calcaires entre Calama et Chacance. Le sillon de la Pampa a été déprimé par rapport aux Cordillères. Sur les versants sont restés accrochés des lambeaux de la surface ancienne dont nous retrouvons les témoins dans les buttes tabulaires de Chacance et Vergara accrochés aux flancs de la Sierra de Moreno ainsi que sur la bordure orientale du bassin de Quillagua. Le soulèvement de la Cordillère de la Côte a entraîné avec lui des lambeaux de formation Loa que nous retrouvons au pied du Cordon de la Encanada et des Cerros de la Angostura. Enfin, ainsi s'explique la structure en escalier de la ceinture d'anhydrites occidentale du bassin de Quillagua et son découpage par les failles d'orientation EW de la Cordillère de la Côte.

Le même processus a joué pour les inselbergs de la Pampa. Les Cerros de la Joya ne portent plus trace

(1) Pour la simplicité de l'exposé, nous utiliserons les termes de « pluvial », « régression » et « interpluvial » dans le sens plus général de « période à augmentation de pluviosité », « fin de période pluvieuse » et « période aride entre deux épisodes pluvieux ».

de la formation Loa, le Cerro Termino, les Cerros de Soledad, le Cono de Hilaricos, la Loma de Sal relevés avec les cordillères déforment et crèvent les sulfates qu'ils supportent, entraînant des lambeaux dans leur surrection et redressant fortement les bancs initialement horizontaux à leur périphérie.

Un nouveau paysage apparaît avec de nouvelles dépressions et de nouvelles hauteurs. Le jeu de l'érosion reprend. La formation Loa est localement détruite et même son substratum est arraché. Ainsi, à la douane de Quillagua, c'est au-dessus des gypses de la formation Loa qu'apparaît un niveau d'argiles rouges. Ce dernier provient vraisemblablement de la Coba sous-jacente à la formation Loa dans le secteur des Cerros de la Joya, seul point du « U » où cette formation est absente.

### *La formation Quillagua*

Après la longue période aride au cours de laquelle la formation Loa a été soumise à l'érosion hydro-éolienne, un nouveau pluvial permet la mise en place de la deuxième formation sédimentaire, emboîtée dans les restes de la précédente. Ce pluvial semble toutefois moins important que le précédent : la stratification serrée, parfois croisée et tourmentée, l'alternance de bancs de diatomites, de limons riches en débris de plantes marécageuses, de croûtes fines et tufs de carbonates ou de sulfates, la présence de lentilles de sables grossiers et de galets permettent de situer le dépôt de la formation Quillagua dans une ambiance lagunaire. Des périodes arides où les limons et diatomites se déposent dans une eau peu profonde, alternent avec des phases plus humides ou de violentes averses mettent en place les éléments plus grossiers. Une chaîne de lagunes, certaines de très petite taille (secteur des Cerros de la Joya) certaines très étendues (Quillagua), s'est installée sur les restes de la formation Loa. Des goulets où la stratification est plus tourmentée, et où les tufs sont fréquents, permettaient une communication sporadique.

La formation Quillagua n'a pas été épargnée par les mouvements tectoniques. Certes, les déformations enregistrées sont moins spectaculaires que celles de la formation Loa, mais elles permettent d'affirmer que le jeu différentiel de blocs qui est intervenu à la fin du dépôt des calcaires s'est prolongé postérieurement. Dans la partie sud du bassin de Quillagua, la formation est soulevée et brisée au contact des Cerros de la Joya, une différence de niveau de 50 m affecte les dépôts de part et d'autre du rio Loa. Dans le secteur du Cono de Hilaricos, de nombreuses

ondulations peuvent être observées. A la proximité de la Cordillère de la Côte, la formation Quillagua est relevée et érodée en biseau.

### *Le rio Loa et les formations alluviales*

Que ce soit le fait de la régression du pluvial qui alimentait les lagunes, ou le fait de mouvements tectoniques, la circulation des eaux se concentre et un réseau hydrographique est creusé dans les sédiments antérieurs. Aucune autre formation sédimentaire que les deux précédentes n'étant recoupée par la vallée du rio Loa, force nous est de situer son creusement immédiatement après le dépôt de la formation Quillagua.

Après un interpluvial aride où le modelé n'a pratiquement pas évolué, intervient un nouveau pluvial.

Ce dernier a été peu important en relation avec les deux précédents : à peine a-t-il permis la sédimentation de la terrasse San Salvador dans le réseau hydrographique du Loa. C'est au cours de ce pluvial que ce sont formés les derniers cônes de déjection provenant de la Sierra de Moreno, en particulier ceux de l'Arca et de Guatacondes qui ont recouvert les zones déprimées du NE du bassin de Quillagua. En effet, il est possible, au sud de la Sierra de Moreno, d'établir une correspondance entre ces cônes de déjection et la terrasse San Salvador. Par contre, il n'existe pas de cône de déjection correspondant à la terrasse inférieure.

Durant la phase régressive de ce pluvial, le creusement des vallées a repris, entaillant la terrasse San Salvador et, localement, les cônes de déjection.

L'état de conservation des formes modelées à cette période permet d'affirmer que durant l'interpluvial aride qui a suivi, les processus d'érosion ou de creusement ont été très atténués.

Enfin une dernière phase pluviale a permis la mise en place de la terrasse inférieure des Argiles de la Vega, localisée dans la vallée du rio Loa. Cette terrasse argileuse, de faible épaisseur témoigne du caractère régressif de ce dernier pluvial par rapport au précédent.

Il est intéressant de noter ce caractère régressif qui affecte l'ensemble des quatre pluviaux. Il traduit une tendance à l'aridité et même la désertification.

De fait, depuis le pluvial de la terrasse des Argiles de la Vega, le paysage a gardé une fixité propre aux déserts. Aucune période pluvieuse notable n'est intervenue depuis lors. La période historique garde le souvenir de coulées boueuses descendues de la

Cordillère des Andes et de la Sierra de Moreno relâchées par des Capitaines de conquistadors. Ces derniers signalent aussi la présence de forêts et de bois sur les flancs de la Cordillère des Andes quelques kilomètres au nord du bassin de Quillagua. Il n'en reste plus que de maigres bouquets de tamarugos et de poivriers, et l'on retrouve encore, enfouis sous quelques mètres de sédiments détritiques fins, des troncs d'arbres parfaitement secs et conservés. Actuellement l'aridité est absolue dans la région.

### *Deux réseaux hydrographiques Loa*

La répartition des terrasses dans la vallée du Loa permet de préciser le tracé du réseau hydrographique (fig. 9).

La terrasse San Salvador n'apparaît pas dans la vallée du Loa entre sa confluence avec le rio San Salvador (Chacance) et sa confluence avec la Quebrada Seca (Toco). Par contre cette terrasse est présente dans la Quebrada Seca et est entaillée (Photo 2, pl. I). Elle se poursuit dans la vallée du Loa et de ses affluents jusqu'à l'étranglement au pied des Cerros de la Angostura, exception faite des Cerros de la Joya, où il ne subsiste qu'un étroit liseré perché au-dessus de la terrasse inférieure. Elle est également présente dans le cours supérieur du Loa et de ses affluents, jusqu'à Chacance.

La lacune de la terrasse San Salvador entre Chacance et El Toco implique qu'il existait en fait deux réseaux hydrographiques (fig. 9).

Le premier ou « Loa 1 », né dans la Cordillère des Andes drainait le Bassin de Calama. Il était constitué du rio Loa supérieur, du rio San Pedro, du rio Salado et du rio San Salvador. Il se perdait dans la région de Chacance où Preuill a identifié un karst ancien dans les calcaires de la Formation Loa.

Le deuxième réseau ou « Loa 2 », constitué de la Quebrada Seca, du rio Loa inférieur, de la Quebrada Amarga et des vallées sèches de la Cordillère de la Côte, drainait la Pampa del Tamarugal. Le tracé des vallées sèches de la Cordillère de la Côte permet de penser que le « Loa 2 » débouchait dans le Pacifique. En effet ces vallées initialement orientées nord-sud s'incurvent vers l'ouest à proximité de leur confluence avec le rio Loa, à quelques kilomètres seulement de l'Océan. Indépendamment des rares précipitations qui alimentaient les vallées de la Cordillère de la Côte — ces dernières sont à peine ébauchées —, l'alimentation en eau du « Loa 2 » était essentiellement karstique : la Quebrada Seca, dont la source n'est guère éloignée de Chacance devait

canaliser à l'air libre les eaux du karst où se perdait le « Loa 1 ». Quant à la Quebrada Amarga, elle recevait les eaux du karst de Llamara.

### *Unification du rio Loa. Deuxième creusement de la vallée. Soulèvement de la Cordillère de la Côte*

Un raccord, qui de Chacance à El Toco a exploité un accident structural de la bordure orientale de la Pampa del Tamarugal a permis la réunion des deux réseaux hydrographiques. L'entrée en service de ce raccord signifie l'arrêt du fonctionnement de la Quebrada Seca. L'état dans lequel apparaît aujourd'hui cette vallée permet de préciser le moment de l'unification. La présence d'une seule terrasse de caractéristiques semblables à celles de la terrasse San Salvador et légèrement entaillée, située ce moment durant la régression qui a suivi la mise en place de la terrasse San Salvador.

Plusieurs indices permettent de penser d'autre part que l'unification du rio Loa a eu lieu au cours d'une période d'activité tectonique qui a permis un deuxième creusement de la vallée.

— La mise en place et le creusement du raccord Chacance-El Toco n'a été possible que grâce à un rejet du système de failles N-S de la bordure orientale de la Pampa.

— L'ancrage de la terrasse San Salvador sur les versants de la vallée du rio Loa dans les Cerros de la Joya est situé à une hauteur anormale au-dessus de la terrasse des Argiles de la Vega. Il semble bien que, après la mise en place de la terrasse supérieure le rio Loa s'est enfoncé par antécédence dans le horst qui a été soulevé à ce moment-là. Ce mouvement de subsidence est encore d'origine tectonique (Photo 3, pl. I).

— Enfin et surtout, le grand Canon que le rio Loa a creusé à travers la Cordillère de la Côte coïncide avec une faille du système d'orientation E-W. Ce creusement qui a provoqué la déconnection des vallées de la Cordillère de la Côte et de la Quebrada Amarga doit être situé au moment de l'unification du rio Loa.

En effet, dans ce cas aussi, la terrasse San Salvador est un indicateur précieux : largement développée entre Quillagua et le massif côtier, elle disparaît sur quelques kilomètres, dans un engorgement de la vallée au pied des Cerros de la Angostura puis réapparaît à la confluence de la Quebrada Amarga avec le rio Loa. Ensuite, on ne retrouve plus trace de la terrasse supérieure jusqu'à l'embouchure. De même que la Quebrada Seca, la Quebrada Amarga comporte une

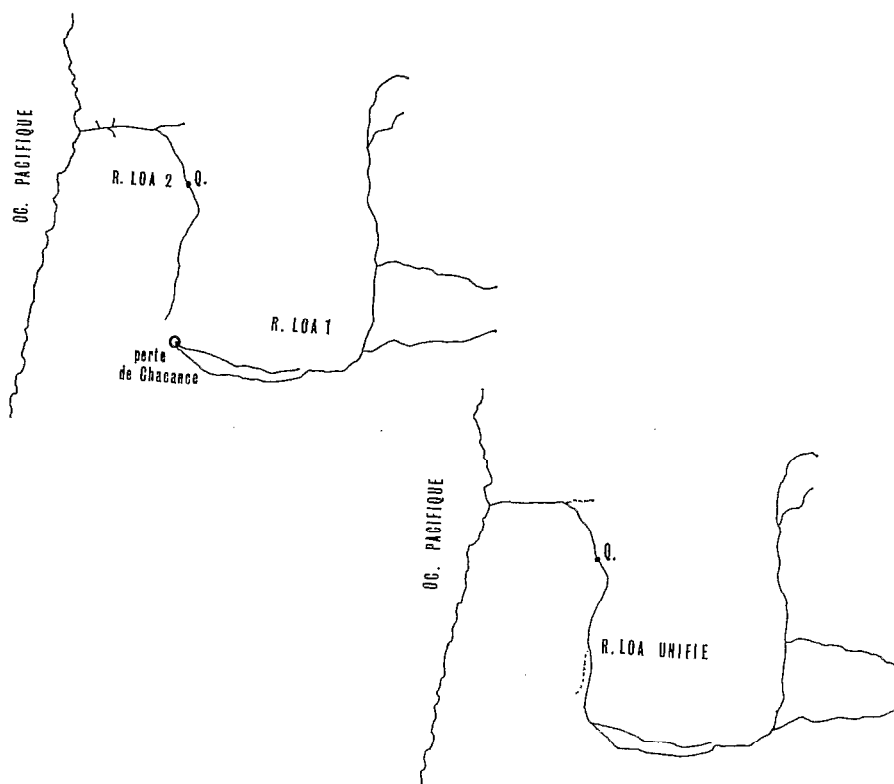


FIG. 9. — Les deux étapes du creusement de la vallée du rio Loa.

terrasse légèrement entaillée de caractéristiques semblables à celles de la terrasse San Salvador. La terrasse des Argiles de la Vega, continue, occupe le fond du Canon.

Nous en concluons que après la mise en place de la terrasse San Salvador, la Cordillère de la Côte a été fortement relevée. Le rio Loa unifié s'y est enfoncé par antécédence, creusant un grandiose canon de 600 m de profondeur et détruisant la terrasse supérieure.

En fait, l'observation des niveaux respectifs du fond de la vallée et des affleurements du socle paléozoïque sur ses versants permet de préciser que le soulèvement de la Cordillère de la Côte correspond plutôt à un basculement autour d'un axe nord-sud. La partie orientale a peu bougé tandis que la bordure occidentale a été relevée de plus de 500 m. Ce soulèvement a aussi affecté les Cerros de la Angostura ainsi que le bloc situé entre le rio Loa et la Quebrada Amarga où les formations sédimentaires apparaissent complètement érodées. Bien que relativement réduit, le soulèvement de ce bloc aurait permis un enfonce-

ment de la vallée du rio Loa au pied des Cerros de la Angostura. Ainsi s'expliquerait la lacune de la terrasse San Salvador en ce point.

La Pampa del Tamarugal a alors acquis sa physiologie actuelle. Ce n'est qu'au cours d'un épisode pluvieux récent et limité que la terrasse des Argiles de la Vega a été mise en place dans la vallée unifiée du rio Loa. Le modelé de la Cordillère de la Côte ne conservant pas trace de ce dernier pluvial, nous pensons qu'il n'a affecté que la région de la haute Cordillère.

#### *Ebauche d'une chronologie*

Quelques points de repère nous permettent de resituer les séquences précédemment analysées dans la chronologie absolue du quaternaire du Norte Grande du Chili :

— Le contact entre la formation Loa et une nappe rhyolitique préexistante a été étudié par Bruggen, (1950) et Preuillh (s.d.). Les calcaires recouvrent en



biseau les rhyolites dans la région de Chiu-Chiu. La « Coba » sous-jacente à la formation Loa est elle-même issue des rhyolites. C'est donc peu après la mise en place des rhyolites et leur érosion partielle qu'il faut situer le dépôt des calcaires de la formation Loa.

Or l'épanchement des rhyolites a été daté par la méthode Potassium-Argon en deux endroits. Dans la région de San Pedro d'Atacama, à proximité de Calama le Geological survey Branch of Isotope Geology indique un âge approximatif de 5 MA. Clark a étudié des échantillons provenant de Copiapo, nettement plus au sud de la région que nous étudions. Il indique un âge plus grand :  $11,6 \text{ MA} \pm 0,5 \text{ MA}$  (1). Cette effusion ignimbritique a donc eu lieu sur une période courant du Pliocène moyen au Pliocène supérieur : les calcaires Loa seraient donc à situer à la fin du Pliocène supérieur.

— Quelques ossements fossiles identifiés comme de *Megaterium Andinae* Medena par R. Casamiquela (2) ont été rencontrés dans les strates de la formation Quillagua. Ce qui nous permet de la situer au début du Pléistocène.

D'autre part les géologues chiliens s'accordent pour situer la surrection de la Cordillère des Andes et de la Cordillère de la Côte au Pliocène supérieur (Corvalan, 1964 et Ruiz Fuller, 1965). Nous avons signalé (voir 4.3.) que la formation Loa a été tectonisée, et que dans la zone de Calama, elle a été fortement relevée puisque il existe une différence de niveau de 1 100 m entre les calcaires de Calama et ceux de la Pampa del Tamarugal. La déformation tectonique de la formation Loa a eu lieu lors de la surrection des Cordillères qui a donné au nord du Chili son faciès actuel. La formation Quillagua s'est mise en place peu après, donc au Pléistocène inférieur.

Il n'existe pas actuellement de donnée absolue sur l'âge de la formation San Salvador. Cependant les observations de terrain concernant les relations entre la formation Quillagua et le rio Loa, permettent de penser que le creusement du canon a eu lieu peu après le dépôt de la formation Quillagua, vraisemblablement lors de la regression du pluvial qui alimentait les lagunes de Quillagua. Les dispositions relatives des derniers glacis quaternaires, des cônes de déjection

et de la terrasse San Salvador sont un indice favorable à un âge assez avancé de la terrasse supérieure. Cette étude a été menée par Preuillh (s.d.) dans la région de Calama.

Enfin des coquillages de la terrasse des Argiles de la Vega ont été datés par la méthode du  $^{14}\text{C}$  (3). Les mesures indiquent un âge de 7 000 à 4 000 ans BP. Si l'on tient compte des observations concernant l'âge avancé de la terrasse supérieure, de l'ordre du Pléistocène moyen, il faut envisager un interpluvial très long entre la Formation San Salvador et la formation des Argiles de la Vega. C'est durant cette longue période aride que se situerait le développement du réseau hydrographique Loa aboutissant à son unification et le dernier soulèvement de la Cordillère de la Côte. Du point de vue climatique l'on serait alors amené à considérer le dernier pluvial comme une pulsation ultime du cours d'une période d'aridification prononcée qui se prolonge encore de nos jours.

L'ensemble des observations qui précèdent peuvent être rassemblées sur le tableau p. 164.

On ne manquera pas de noter l'importance de la tectonique dans l'histoire récente de cette région. Cette histoire peut se résumer à l'alternance de brèves périodes humides où sont mises en place les séries sédimentaires avec de longues périodes arides où interviennent les bouleversements tectoniques. La chronologie de la tectonique récente du nord du Chili peut ainsi être connue grâce à celle des formations sédimentaires. De ce point de vue, l'ébauche chronologique présentée ci-dessus présente une lacune importante ; la connaissance de l'âge précis de la terrasse San Salvador est indispensable pour situer le dernier mouvement tectonique de grande ampleur qui a affecté le nord du Chili.

## CONCLUSION

Ainsi nous paraissent s'enchaîner les diverses étapes du remplissage sédimentaire de la Pampa del Tamarugal. Ce dernier coïncide avec l'histoire du Quaternaire du Nord chilien. Rythmé par les mouvements tectoniques et le volcanisme, il voit s'installer dans le nord du Chili un climat de plus en plus aride qui aboutit au désert actuel.

Bien que d'une aridité absolue, la Pampa del Tama-

(1) Clark A.H. *et al.* : Implication of the isotopic ages of ignimbrites flows Southern Atacama desert. Chile (*Nature* - London 215. 1967, pp. 723-724).

(2) Museo de Historia natural, Santiago-Chile.

(3) Renseignement oral donné par Lanning (R.) Columbia University. New York.

PLANCHE I



PHOTO 1. — Le rio Loa à Chacance. Au premier plan : la terrasse des Argiles de la Vega. Au deuxième plan : la «Coba» entaillée par la rivière. Vers le haut de la pente, les strates de la formation Quillagua, estompées par des formations de pente.

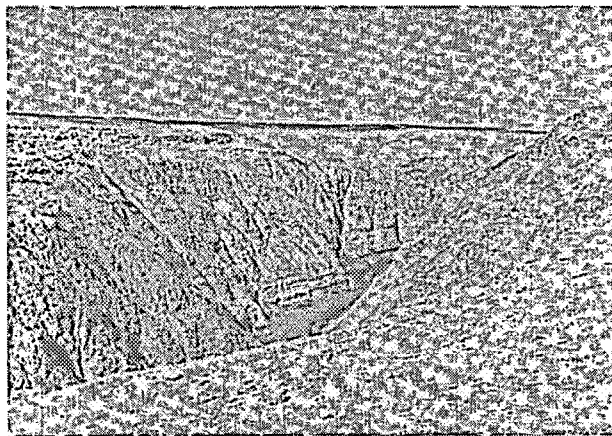


PHOTO 3. — Le rio Loa au cours de sa traversée du massif cristallin des Cerros de la Joya. Au bas de la falaise, les restes de la terrasse San Salvador, suspendus au-dessus de la terrasse inférieure. En haut, la formation Quillagua. A l'arrière plan, la Sierra de Moreno.



PHOTO 2. — La Quebrada Seca non loin de sa confluence avec le rio Loa. Au premier plan : la terrasse San Salvador partiellement entaillée. A l'arrière plan : la formation Quillagua.



PHOTO 4. — Coupe de la douane de Quillagua. A la base, à gauche, près de la barrière douanière : un éperon de gypse de la formation Loa. Au-dessus, jusqu'à une dizaine de mètres au-dessus de la voie ferrée, les argiles rouges semblables à la «Coba». Au-dessus, la formation Quillagua. Le train donne l'échelle.

PLANCHE II



PHOTO 1. — Les bancs de diatomite et de cendres de la formation Quillagua.

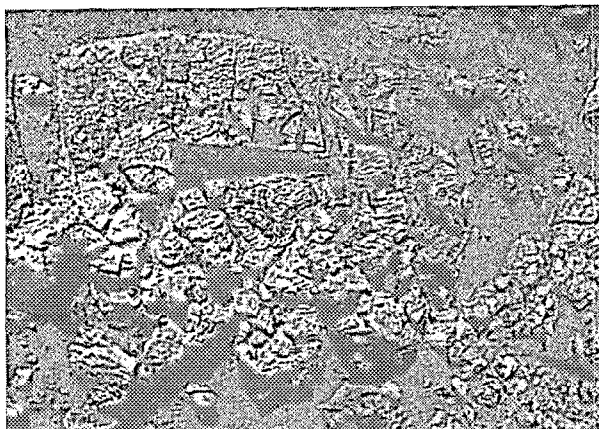


PHOTO 3. — Micro-lapies à la surface de l'anhydrite dans le karst du bassin de Quillagua.



PHOTO 2. — Banc d'anhydrite dans le karst de la bordure NW du bassin de Quillagua.

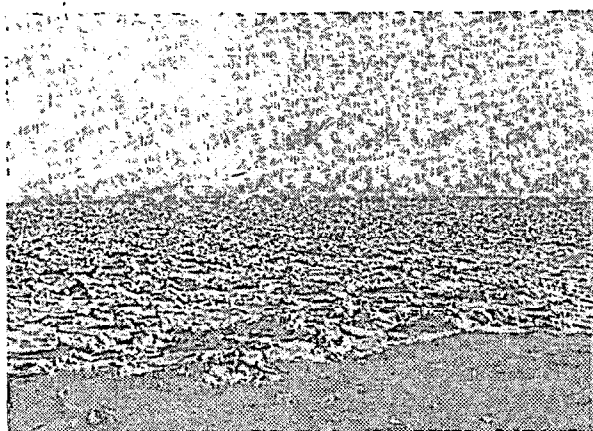


PHOTO 4. — Le salar de Llamara.

Episode	Age approximatif	Interprétation paléoclimatique
Epanchement des Rhyolites	Pliocène moyen à supérieur 11,5 à 5 MA.	
Rajeunissement tectonique - érosion - mise en place du conglomérat de base et de la Coba		Début du pluvial
Formation Loa	Pliocène supérieur	Pluvial
Surrection des Cordillères déformation de la formation Loa		Interpluvial aride
érosion		
Formation Quillagua	Pléistocène inférieur	Début du pluvial Pluvial
Etablissement du Karst		Régression
Creusement des réseaux Loa 1 et Loa 2		Interpluvial aride
Terrasse San Salvador Cônes de déjection	Pléistocène inférieur à moyen (?)	Pluvial
Deuxième creusement du réseau hydrographique Loa		Régression
Unification des deux réseaux Loa		Interpluvial aride
Soulèvement de la Cordillère de la Côte déformation de la formation Quillagua		
Terrasse des Argiles de la Vega	Holocène (7 000 - 4 000 ans BP)	Pluvial
	Actuel	Aride

rugul est paradoxalement traversée par une rivière perenne : le rio Loa. L'évolution du tracé de ce dernier reflète les fluctuations climatiques de la période quaternaire dans la région. Ainsi tout en assurant l'exoréisme du bassin de Calama, l'unification du rio Loa a consacré l'endoréisme du bassin de Quillagua. L'ancien réseau « Loa 2 » déconnecté n'est constitué que d'oueds morts. Le bassin de Quillagua n'est plus qu'une cuvette endoréique traversée par une rivière allogène. Le karst n'est cependant pas tout à fait mort. L'existence des « cénotes » permet de supposer que des nappes profondes alimentent le rio Loa par circulation souterraine, ce qui explique pourquoi cette rivière de dimensions fort modestes n'est jamais à sec malgré l'aridité exceptionnelle du Norte Grande du Chili et un trajet de quelques 200km à travers le désert sans recevoir le moindre affluent. Ces mêmes nappes déterminent la dynamique actuelle du bassin de Quillagua et sont à l'origine du chott qui en occupe le centre : le Salar de Llamara (Photo 4, pl. II).

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 26 juin 1975

#### BIBLIOGRAPHIE

- BRUGGEN (J.), 1950. — Fundamentos de la geologia de Chile. *Inst. Geogr. Militar*. Chile.
- CORVALAN (J.), 1964. — y col. Geologia de la Cordillera de la Costa entre los rios Aconcagua y Mataquito. Edad de las rocas graníticas de la Cordillera de la Costa entre los paralelos 32°30' y 38°20'. *Inst. Inv. Geol.* (en préparation).
- COURTY (G.), 1907. — Explorations géologiques dans l'Amérique du Sud suivi de tableaux météorologiques. (Mission scientifique G. de CREQUI MONTFORT et E. SENECHAL de LA GRANGE). Imprimerie nationale. Lib. H. le Soudier. Paris.
- HUSTEDT (J.), (s.d.). — Fossile Bacillariaceen aus dem Loa-Becken in der Atacama-Wüste, Chile. Cité par WETZEL in Beiträge zur Erdgeschichte des Mittleren Atacama. Pompeckj-Festband. pp. 556-557.
- PHILIPPI (R.A.), 1860. — Reise durch die Wüste Atacama auf Befehl der Chilenische Regierung im Sommer 1853-54 unternommen und beschrieben. Halle 1860.
- PREULH (M.), (s.d.). — Géomorphologie de la région de Calama, Chili. (En préparation).
- RUIZ FULLER (C.), 1965. — Geologia y Yacimientos Metalíferos de Chile. *Inst. Inv. Geol. Chile*.
- TRICART (J.), 1966. — Un chott dans le désert chilien : la Pampa del Tamarugal. *Rev. Géomorph. Dyn.* XVI, 1, pp. 12-22.
- WETZEL (W.), 1927. — Beiträge zur Erdgeschichte der Mittleren Atacama. Pompeckj-Festband; (In *Jahrbuch für Mineralogie, etc.*, Beilageband LVIII. Abt. B.), pp. 505-578.